

в результате инверсии фаз является преимуществом данного способа приготовления суспензии уголь- CO_2 .

Список использованных источников

1. Развитие поточных газификационных технологий в Азиатско-Тихоокеанском регионе (обзор) / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Цзэн Линьянь, П.В. Осипов // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 40-50.
2. The Phase Inversion-based Coal- CO_2 Slurry (PHICCOS) feeding system: Technoeconomic assessment using coupled multiscale analysis / C. Botero, R. P. Field, H. J. Herzog, A. F. Ghoniem // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. №18. P. 150-164.
3. Schinignit M., Tietze G. Combined use of carbon dioxide and nitrogen in a component of a powder injection system for use in pulverized coal gasification under pressure. 2008.
4. Grabner M. Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal. John Wiley and Sons (WILEY). 2014. – 365 с.
5. . Techno-economic assessment of two novel feeding systems or a dry-feed gasifier in an IGCC plant with Pd-membranes for CO_2 capture / M. Gazzania, D. M. Turi, A. F. Ghoniemb, E. Macchia, G. Manzolin // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2014. V. 25. P. 62-78.
6. Zheng L., Furinsky E. Comparison of Shell, Texaco, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations // Energy Conversion and Management. 2005. № 46. P. 114-120.

УДК 662.76

Д. К. Смирнов, Т. Ф. Богатова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ ОТКРЫТОГО И ЗАМКНУТОГО ЦИКЛОВ

Аннотация

В работе рассмотрены газотурбинные установки открытого и замкнутого циклов. Проанализированы достоинства и недостатки таких ГТУ. Показано, что в ГТУ замкнутого цикла возможно использование более широкого диапазона топлив, включая твердое топливо и низкосортное жидкое топливо. Приведены данные по источникам тепла в газотурбинных установках замкнутого цикла, в качестве которых могут использоваться органическое топливо, ядерное топливо, биомасса, концентрированная солнечная энергия, теплота отходящих газов. Выбор рабочего тела для ГТУ замкнутого цикла в значительной мере определяет конструкцию, габариты и эксплуатационные характеристики установки. Рассмотрена возможность применения в качестве рабочего тела помимо воздуха и азота также гелия и CO_2 .

Ключевые слова: ГТУ открытого цикла, ГТУ замкнутого цикла, рабочая жидкость, топливо.

Abstract

Opened-cycle and closed-cycle gas turbine units are considered in the paper. Merits and demerits of such GTU are analyzed. It is shown that in closed-cycle GTU the use of wider range of fuels, including solid fuel and low-grade liquid fuel is possible. Data on heat sources in closed-cycle gas turbine unit as which organic fuel, nuclear fuel, biomass, the concentrated solar energy, warmth of flue gases can be used, are provided. The choice of a working medium for closed-cycle GTU considerably defines a design, dimensions and operational characteristics of the unit. The possibility of application as a working medium besides air and nitrogen also of helium and CO₂ is considered.

Key words: *Opened-cycle gas turbine unit, closed-cycle gas turbine unit, working medium, fuel.*

Газотурбинные установки к концу XX в. прочно вошли в мировую электроэнергетику. Создание на их базе парогазовых установок (ПГУ) с интеграцией в едином цикле газотурбинной и паротурбинной установок позволило достичь рекордных значений КПД – более 60 %. В энергетике России ГТУ и ПГУ стали активно внедряться только в XXI в., при этом в основном использовались импортные газотурбинные установки. И сегодня доля отечественных ГТУ составляет около 30 %. Данные об энергетических ГТУ, установленных на ТЭС и промышленных ТЭЦ приведены в таблице [1].

Таблица

Энергетические ГТУ в России (на 01.01.2017 г.)

Газотурбинные установки	Количество ГТУ, шт.	Мощность ГТУ, МВт	ГТУ в составе ПГУ, шт.	Мощность ГТУ в составе ПГУ, МВт
ГТУ всего в том числе	2152	28088	129	15181
Микротурбины (1 МВт и менее)	909	144	0	0
малой мощности (1–25 МВт)	997	7127	13	187
средней мощности (25–100 МВт)	179	7788	59	3262
большой мощности (100–300 МВт)	52	8608	42	7310
сверхмощные (более 300 МВт)	15	4422	15	4422

Наибольшее применение в энергетике нашли ГТУ с открытым (разомкнутым) циклом (рис. 1). В ГТУ открытого цикла забираемый из атмосферы воздух сжимается в компрессоре и при высоком давлении подается в камеру сгорания ГТ, где осуществляется изобарное сжигание газообразного или жидкого топлива.

Преимуществами ГТУ открытого цикла являются следующие факторы:

- высокая маневренность за счет быстрого прогрева и охлаждения;
- отсутствие потребности в охлаждающей воде и, соответственно, в системе технического водоснабжения;
- компактность и малый вес;
- умеренные капитальные затраты.

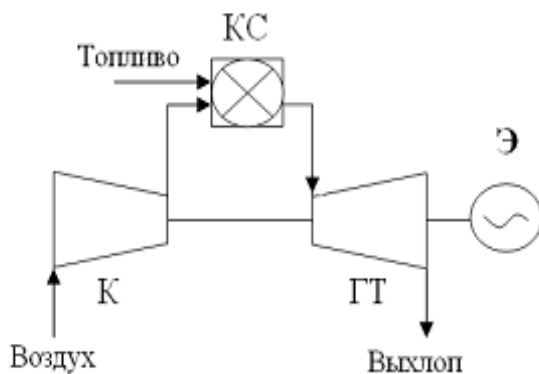


Рис. 1. Схема ГТУ открытого цикла:
ГТ – газовая турбина; К – компрессор;
КС – камера сгорания; Э – электрогенератор

В ГТУ замкнутого цикла вместо камеры сгорания используется нагреватель, в который компрессором нагнетается газ или воздух (рис. 2). В нагреватель подводится теплота от внешнего источника, например, продукты сгорания органического топлива. Совершивший в ГТ работу газ или воздух поступают в охладитель, где происходит отвод теплоты, например за счет подачи охлаждающей воды. Затем газ или воздух поступают в компрессор и цикл повторяется.

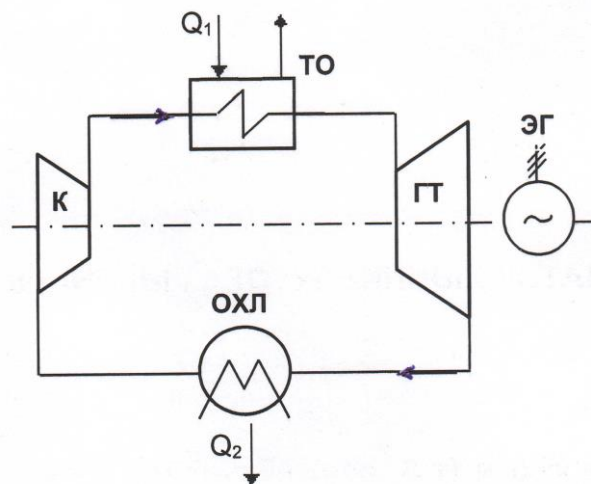


Рис. 2. Схема ГТУ замкнутого цикла:
ГТ – газовая турбина; К – компрессор;
ТО – теплообменник; ОХЛ – охладитель;
ЭГ – электрогенератор

К недостаткам можно отнести высокие требования к чистоте рабочего тела ГТ, так как в ГТУ открытого цикла продукты сгорания непосредственно контактируют с рабочими лопатками турбины. Поэтому в таких ГТУ можно применять только газ и высококачественное жидкое топливо с минимальным содержанием оксидов серы и других примесей.

К преимуществам замкнутого цикла ГТУ можно отнести:

- возможность использования твердого или низкосортного жидкого топлива, так как в такой схеме нет прямого контакта продуктов сгорания и рабочих лопаток ГТ;
- в замкнутой схеме ГТУ низшее давление может быть значительно выше атмосферного, поэтому при тех же степенях повышения давления можно применять более высокие давления, что приводит к уменьшению объема газа и, соответственно, габаритов установки;
- возможность выбора и использования

в качестве рабочего тела ГТ газообразных веществ, обладающих наилучшими теплофизическими свойствами.

К недостаткам можно отнести наличие достаточно габаритного котла, большие габариты теплообменников и ограничения температуры цикла условиями работы металла теплообменника.

Эффективность ГТУ замкнутого цикла определяется выбором рабочей жидкости, источника теплоты технологической схемы [2].

Источником тепла могут служить органическое топливо, ядерное топливо, биомасса, концентрированная солнечная энергия, теплота отходящих газов.

При использовании органического топлива или биомассы ГТУ замкнутого цикла могут быть интегрированы с низкоэмиссионными установками, например, с котлами с кипящим слоем или с системой *CCS*, при этом стоимость вырабатываемой электроэнергии будет на 15 % ниже, в чем в паротурбинном цикле на сверхкритических параметрах с *CCS*.

Использование ядерных реакторов в качестве источника теплоты является перспективным направлением, поскольку работающие при более высокой температуре рабочей жидкости ГТУ являются хорошей альтернативой традиционным паровым турбинам насыщенного пара, используемым на АЭС.

Еще одним источником теплоты могут стать концентраторы солнечной энергии, способные при современном уровне развития технологии обеспечить температуру рабочей жидкости свыше 1000 °С.

Использование сбросной низкопотенциальной теплоты различных промышленных процессов представляет глобальный интерес в связи с масштабом проблемы. Разработки в этом направлении ведутся весьма интенсивно, и уже имеется опыт эксплуатации коммерческой установки мощностью 8 МВт в США.

Выбор рабочей жидкости для ГТУ замкнутого цикла в значительной мере определяет конструкцию, габариты и эксплуатационные характеристики установки. Наиболее доступными и хорошо апробированными средами являются воздух и азот, однако работа ГТ на этих газах характеризуется большими потерями давления и необходимостью иметь высокую температуру рабочей среды, низким коэффициентом теплопередачи по сравнению с гелием, ограничением по мощности ГТУ. Работа ГТ на гелии имеет преимущества в виде низких потерь давления, хорошего коэффициента теплоотдачи, инертности по отношению к конструкционным материалам. Недостатками являются усложнение конструкции ГТ в связи с увеличением числа ступеней, необходимость иметь высокую температуру рабочей среды, ограниченный опыт проектирования.

Уникальные свойства диоксида углерода (высокие коэффициент теплоотдачи и КПД при умеренных температурах, хорошие параметры критической точки – 7,38 МПа, 30,98 °С, снижение материалоемкости по сравнению с гелиевым циклом в 5 раз) вызвали интерес к применению CO_2 в качестве рабочего тела ГТ. Консорциумом университетов и исследовательских центров США, Японии и Чехии был разработан замкнутый цикл с S-CO_2 с использованием тепла уходящих газов в качестве источника теплоты, и создана установка мощностью 1 МВт, успешно прошедшая испытания в 2012 г. В 2014 г. установка мощностью 8 МВт была пущена в коммерческую эксплуатацию компанией *Echogen Power Systems* (США) [3].

ГТУ замкнутого и полужамкнутого сложнее по конструкции, но экономичнее открытых ГТУ на переменных режимах, а также позволяют использовать дешевые твердые топлива. Недостаток ГТУ замкнутого и полужамкнутого циклов заключается в более низкой температуре рабочего тела, чем в открытых ГТУ, из-

за ограничений по условиям работы теплообменного оборудования, что соответственно уменьшает их КПД. Таким образом, ГТУ замкнутого цикла способны заменить классические ГТ, но они имеют свою область применения, например, в атомной энергетике. Большая часть современных ГТУ работает с открытым контуром.

Список использованных источников

1. Потребности электроэнергетики России в газовых турбинах: текущее состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2017. №11. С. 53-63.
2. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля / под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 564 с.
3. Reuters Echogen Power Systems waste heat recovery system available as turn-key solution, 2014. [Электронный ресурс]: офиц. сайт – Режим доступа: <http://www.echogen.com/waste-heat-to-power>.

УДК 662.613

Д. Н. Степанов, А. Ф. Рыжков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДЕМЕРКУРИЗАЦИИ СИНТЕЗ-ГАЗА

Аннотация

Ртуть является наиболее опасным представителем среди токсичных металлов. Превышение дозы облучения ртутью свыше 0,1 мкг/кг массы тела/день может привести к возникновению неврологических эффектов от воздействия ртути во время развития плода и раннего детства. Однако, ртуть не только оказывает негативное влияние на окружающую среду, но и вызывает коррозию проточной части газовой турбины на электростанциях следующего поколения таких как парогазовые установки с внутрицикловой газификацией (ПГУ–ВЦГ или IGCC). С термодинамической точки зрения наиболее эффективной является демеркуризация при высокой температуре синтез-газа. Однако, на данный момент нет проверенных технологий удаления ртути при высокой температуре.

Ключевые слова: ртуть, демеркуризация, активированный уголь, пропитанный биоуголь.

Abstract

Mercury is the most dangerous representative among toxic metals. Exceeding the dose of mercury exposure above 0.1 µg/kg body weight/day can lead to neurological effects from exposure to mercury during fetal development and early childhood. However, mercury not only has a negative impact on the environment, but also causes corrosion of the flowing part of the gas turbine at next-generation power plants such as combined cycle gasification plants (IGCC). From the thermodynamic point of view, demercurization at high temperature of the syn-gas is the most effective. However, at the moment there are no proven mercury removal technologies at high temperature.

Key words: mercury, demercurization, activated carbon, impregnated biochar.